

推进剂加注后末修贮箱压力变化机理

¹庞建国, ¹刘小平, ¹邵永平, ²郭凤美

(¹太原卫星发射中心, 山西 太原 030027; ²中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘 要: 利用推进剂加注前、后及发动机待机过程中末修贮箱的温度、压力参数, 结合国外资料给出的 15℃ 时 N_2O_4 推进剂中氮气溶解度曲线, 确定了加注过程中的氮气溶解量, 给出了氮气分压初值, 用迭代方法计算出推进剂贮箱在任一温度下的压力, 为判断贮箱泄漏提供了有效手段。

关键词: 四氧化二氮; 饱和蒸汽压; 氮气分压; 氮气溶解度

中图分类号: V434. 23

文献标识码: A

文章编号: (2005)05-0015-04

Pressure variation mechanism of filled propellant tank for attitude control engine

¹Pang Jianguo, ¹Liu Xiaoping, ¹Shao Yongping; ²Guo Fengmei

(¹Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030027, China;

²China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The mass of dissolved N_2 in N_2O_4 propellant tank is determined based on the tank temperature, pressure and the dissolvability of N_2 in N_2O_4 at 15℃. N_2 initial pressures at any temperature were calculated iteratively. This is a good approach for leakage detection of propellant tanks.

Key words: N_2O_4 ; saturated pressure; N_2 pressure; N_2 dissolvability

1 引言

某末修姿控发动机系统在推进剂加注后长期待机时, 发现氧化剂贮箱压力有所下降。该种推进剂具有极强腐蚀性, 如果压力下降是由于推进

剂泄漏引发, 那么推进剂泄漏后将引起箭体腐蚀、变形, 进而结构强度下降, 严重时造成灾难性故障。因此, 对贮箱压力下降的原因进行深入的分析, 继而找到有效的应对措施对保障飞行器的安全有着非常重要的意义。

2 机理分析

经分析认为,氧化剂贮箱压力变化有以下三个原因:贮箱泄漏;氮气溶解;温度变化。

上述三个原因导致贮箱压力变化具有三种明显不同特征:

(1) 如果出现贮箱泄漏,贮箱压力就会持续下降,直到贮箱压力与外界大气压力平衡。因为气体泄漏率一般保持恒定不变或者逐渐增大,而不可能自然逐渐降低。

(2) 如果是氮气溶解引起的压力变化,当氧化剂中溶解的氮气达到饱和之后,贮箱压力基本上不再变化。19 世纪 60 年代,美国为研究氮气在推进剂中的溶解度以及氮气在推进剂中的溶解对飞行器性能的影响,在加注四氧化二氮推进剂后,用氮气给贮箱反复增压,得出了推进剂中氮气溶解度数据,见图 1、2。

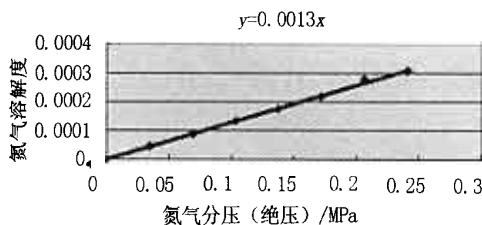


图 1 0℃时推进剂中氮气的溶解度曲线

Fig.1 Dissolvability curve of N_2 in propellant at 0℃

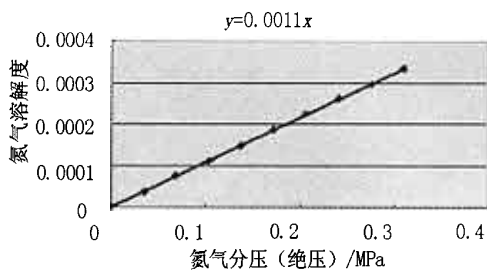


图 2 15℃时推进剂中氮气的溶解度曲线

Fig.2 Dissolvability curve of N_2 in propellant at 15℃

(3) 温度变化对贮箱压力的影响使贮箱压力在某一数值上下波动。温度变化引起贮箱压力变化机理为:温度变化引起推进剂热胀冷缩,进而导致贮箱气枕容积变化;温度变化使得推进剂饱和蒸汽压变化;温度引起气枕中氮气变化符合理万方数据

想气体变化规律。

某发动机在待机过程中曾数次通过遥测参数检查贮箱压力,发现压力呈现波动状态,而且波动范围不大。经过运输、起竖,使得推进剂产生晃动、对流,为氮气溶解创造了条件。推进剂中氮气溶解达到饱和后,贮箱压力在某一区域内波动,说明贮箱不存在泄漏现象。

氮气在氧化剂中溶解的过程比较复杂,涉及时间、压力、温度、推进剂流动状态、推进剂中初始氮气溶解量、贮箱气枕容积等诸多因素。

发射前贮箱中氮气的溶解有三个过程:

(1) 加注前,推进剂罐经远距离运输、长期贮存后推进剂在 p_0 压力下氮气溶解达到饱和。

(2) 加注过程中,在较高的挤压压力下一些氮气继续溶入推进剂。

(3) 加注后发射前经过运输、起竖和存放以及不同的温度环境使得氮气继续溶入推进剂或者从推进剂中逸出。

贮箱压力的变化包括:温度变化引起的贮箱压力变化和氮气溶解引起的压力变化两部分。温度变化引起的贮箱压力变化表现在:推进剂饱和蒸汽压的变化、推进剂体积的变化引起气枕容积的变化、气枕中氮气压力的变化。

由此可见,贮箱压力的变化中,扣除由推进剂温度引起的压力变化,就可以得到氮气溶解引起的压力变化;扣除加注前推进剂中氮气溶解量和加注后存放期间由气枕中溶入的氮气量,就可以得到加注过程中的氮气溶解量。

已知加注前加注罐存放温度、氮气保护压力、贮箱容积、推进剂加注量、加注结束时贮箱压力,根据资料给出的 15℃时 N_2O_4 推进剂中氮气溶解度曲线以及各种温度下推进剂饱和蒸汽压,结合加注过程中的氮气溶解量,可计算出长期待机过程中推进剂贮箱在任一温度下的压力。

3 计算

3.1 假设

假设条件为:加注前,推进剂加注罐在长期存放后氮气溶解达到饱和;推进剂加注过程中的贮箱压力、加注时间不变,由此认为加注过程中氮

气溶解量不变;加注后经长期待机,推进剂中氮气溶解达到饱和;气枕中,氮气压力变化符合理想气体状态方程;液体推进剂不可压缩,密度 ρ 只与温度 t 有关。

3.2 已知数据

加注前,推进剂加注罐在停放期间充氮气保护压力为 p_0 (MPa), 环境温度为 t_0 (°C), $T_0(K)=273.15+t_0$,推进剂饱和蒸汽压为 p_{s0} (MPa);推进剂加注质量 m_p (kg);贮箱容积 V (m³);加注结束时,贮箱压力为 p_{ta0} (MPa);当地海拔高度下的大气压强为 p_H (MPa);海平面的大气压强为 p_2 (MPa);存放期间,全弹总检查中遥测测量的贮箱温度为 t (°C), $T(K)=t+273.15$, 贮箱压力为 p_{ta} (MPa), 推进剂饱和蒸汽压为 p_{st} (MPa);氮气气体常数 R 为297 J/(kg·K)。

3.3 计算

推进剂中氮气的溶解度曲线采用资料中给出的15°C时氮气溶解度曲线,见图2。

(1) 在加注前推进剂温度 t_0 、加注罐压力 p_0 下,加注质量 m_p 中氮气的溶解质量 m_{N1} (kg),则

$$p_{s0}=10^{5.1370-\frac{1782.2}{T_0}}$$

$$m_{N1}=m_p\times(p_0+p_2-p_{s0})\times0.0011$$

(2) 加注结束时贮箱气枕中氮气质量 m_{gN1} (g)。

推进剂加注结束时,推进剂密度为 ρ_{pr0} ,推进剂加注质量 m_p 所占容积 V_p ,贮箱中气体温度为 t_0 ,贮箱压力为 p_{ta0} ,贮箱气枕容积 V_g ,气枕中氮气压分为 p_{N1} ,则

$$V_p=m_p/\rho_{pr0}$$

$$V_g=V-V_p$$

$$p_{N1}=p_{ta0}+p_H-p_{s0}$$

$$m_{gN1}=p_{N1}\times V_g/RT_0$$

(3) 待机过程中贮箱气枕中氮气的减少量 Δm_{gN} (g)。

待机过程中推进剂温度 t ,推进剂密度为 ρ_{pr} ,

推进剂质量 m_p 所占容积 V_{pt} ,贮箱压力 p_{ta} ,贮箱的气枕容积 V_{gt} ,推进剂饱和蒸汽压 p_{st} ,氮气压分 p_{N2} ,气枕中氮气质量 m_{gN2} (g),则

$$V_{pt}=m_p/\rho_{pr}$$

$$V_{gt}=V-V_{pt}$$

$$p_{st}=10^{5.1370-\frac{1782.2}{T}}$$

$$p_{N2}=p_{ta}+p_H-p_{st}$$

$$m_{gN2}=p_{N2}\times V_{gt}/RT$$

$$\Delta m_{gN}=m_{gN1}-m_{gN2}$$

(4) 待机过程中贮箱推进剂质量 m_p 中溶解的氮气质量 m_{N2} 。

$$m_{N2}=0.0011\times p_{N2}\times m_p$$

(5) 加注过程中,氮气由气体溶解到推进剂 m_p 中的质量 Δm_N 。

$$\Delta m_N=m_{N2}-\Delta m_{gN}-m_{N1}$$

在以后贮箱压力计算中,认为加注过程中氮气由气体溶解到推进剂 m_p 中的质量 Δm_N 恒定。

4 长期待机过程中任一温度下贮箱压力

待机过程中,贮箱推进剂温度范围为10°C~30°C,加注过程氮气溶解质量为 Δm_N 。给出贮箱氮气压分初值,可以计算出贮箱在任一温度下的压力。贮箱压力计算结果见表1。

表1 贮箱压力计算结果

Tab.1 Calculated results of tank pressure

贮箱温度 /°C	氮气压分 /MPa	溶解度曲线	贮箱压力 /MPa(g)
10	0.255	y=0.0011x	0.2419
15	0.265	y=0.0011x	0.2696
20	0.275	y=0.0011x	0.3048
25	0.285	y=0.0011x	0.3475
30	0.299	y=0.0011x	0.3982

表 4 4172 绝缘性能改进后的性能

Tab.4 Properties of 4172 rubber with improved insulation property

项 目	指 标	未加防霉剂	防霉剂 A（少量）
扯断强度/MPa	11	9.5	9.2
扯断伸长率/%	200	258	240
扯断永久变形/%	10	8	8
邵尔 A 硬度/度	78±5	80	79
击穿电压/(kV/mm)		11.36	10.56
绝缘电阻/500V, Ωcm	500×10 ⁶	2.44×10 ¹¹	3.54×10 ¹¹
绝缘电阻/1000V, Ωcm		1.65×10 ¹¹	4.1×10 ¹¹

5 结论

按照 W460-1 与 G470-2 氯丁橡胶专用配方炼制的混炼胶适合于某型号产品生产使用，能够满足技术条件规定的要求；在电缆生产中通过按规定比例添加防霉剂后炼制的混炼胶性能符合标准 Q/Da1026-2003《防霉菌专用混炼胶》的规定，满足了顾客的需求。

参考文献:

[1] 谢遂志等编著. 橡胶工业手册第一分册, 生胶与骨架材料[M]. 化学工业出版社, 1989 年.

[2] 刘登祥译. 氯丁橡胶加工技术[M]. 化学工业出版社, 1980 年.
[3] 谭向东编译. 橡胶工业[J]. 1996, (10).
[4] 缪桂韶. 橡胶配方设计[M]. 华南理工大学出版社, 2000 年.
[5] 梁星宇, 周木英主编. 橡胶工业手册第三分册, 配方与基本工艺[M]. 化学工业出版社, 1989 年.
[6] 杨清芝. 现代橡胶工艺学[M]. 中国石化出版社, 1997 年.
[7] 谢忠麟, 杨敏芳编著. 橡胶制品实用配方大全[M]. 化学工业出版社, 1998 年.

(编辑: 王建喜)

(上接第 17 页)

5 结束语

在推进剂加注后的长期待机过程中，利用本文提供的方法，通过分析贮箱遥测数据的温度、压力参数，可以有效判断贮箱是否发生泄漏，确保飞行安全。

参考文献:

[1] 戈肯 N.A. 推进剂中溶解氮对导弹性能的影响[R]. 万方数据

AD-425476, 1963.
[2] 郭霄峰等编. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
[3] 朱宁昌等编. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 宇航出版社. 1994.
[4] 高思秘等编. 液体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社, 1989.
[5] 陈新华等编. 运载火箭推进系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

(编辑: 陈红霞)